



朱继宏 ZHU Jihong

国家优秀青年科学基金获得者

Excellent Young Scientists Found of NSFC

西北工业大学教授

Professor of Northwestern Polytechnical University


西北工业大学机电学院党委副书记(主持工作),博导,比利时列日大学航空航天技术实验室(LTAS)博士,伦敦玛丽女王大学客座教授,中组部“万人计划”青年拔尖人才,担任工信部金属高性能增材制造与创新设计重点实验室副主任。从事飞行器结构轻量化与性能优化设计、航天器结构系统动力学优化设计、高速飞行器隔热-承载一体化结构设计、智能变体结构优化设计、面向增材制造的结构拓扑优化设计研究。发表论文100余篇,SCI检索48篇,出版英文专著2部,获授权发明专利20余项。曾获国家自然科学基金二等奖和陕西省科学技术一等奖、二等奖各1项,以及航空学会青年科技奖、钱令希计算力学青年学者奖、EDP Science杰出贡献奖、中日韩机械结构系统优化设计青年科学家奖、CADLM国际青年优化设计人才奖等。

材料-结构-工艺一体化优化设计 破解构件高性能轻量化难题

——访西北工业大学机电学院教授朱继宏

Integrated Optimization Design of Material-Structure-Process for High-Performance and Lightweight Structures

本刊记者 良辰

: 高性能构件多服役于苛刻环境,一般具有超强承载、极端耐热、超高精度、超轻量化和高可靠性等特性,但受材料、结构和工艺等多重因

素的耦合影响,目前在性能设计、整体制造及精确成形等方面存在困难,您认为解决的有效途径是什么?

朱继宏: 回答这个问题,我们先

分析一下高性能构件在设计和制造方面具体存在哪些难题,特别是面向未来航空航天飞行器和运载器等的发展需求,迫切要去解决的难题。


首先从结构性能设计方面来看,多年来我们一直大量采用的是单一材料体系结构,例如常见的均质金属结构,材料和结构的力学行为和相关表征模型都已经研究得相对比较透彻,那么相应的设计方法也会相对简单一些。从20世纪五六十年代开始,随着计算力学相关理论和计算机硬件水平的发展,先后经历了尺寸、形状、拓扑等优化设计方法。这些设计方法对应的设计参数变量、设计对象等日趋复杂,特别是设计问题规模和设计空间的自由度越来越大,在性能提升和减轻重量等方面的效果也越来越好。我们开展的大量设计案例也体现了这个趋势,例如与经验设计方案相比,尺寸优化和形状优化普遍能够在保持力学性能的前提下减重5%~10%,但是这些设计模式都必须在一个已经比较详细的初始方案基础上开展,其结构形式无法发生质的变化,因此减重幅度也相对较为有限。近30年来,快速发展的拓扑优化方法不需要从一个详细的初始设计开始,几乎是完全自由地实现结构构型设计,因此具有很大的设计自由度,一般可实现减重15%~30%。但是近年来,拓扑优化发展越来越成熟,材料在设计空间的自由布局已实现按照性能要求近乎最优的设计,这就带来了新的问题,就是还有没有进一步让结构提升性能和减重的空间?

如果仍然以单一材料体系结构为设计对象,其减重增效确实已经接近极限,但是,如果引入更多的设计自由度,把单一材料体系的结构拓展到组合式、复合式材料与结构形式,发展新的材料-结构一体化设计方法,实现“把合理的材料按照性能要求放在结构合理的位置上”,就能充分发挥不同材料、不同微结构在不同方向和部位的承载优势,从而提高结构整体性能。而且多种材料在宏观细观的组合可实现更多的功能,如防隔热、减振等,这就为实现未来超轻

质、高强韧、多功能的结构奠定了基本设计思路和模型。其现在在大规模运用的树脂基、金属基、陶瓷基复合材料上可以说是当前最具代表性的材料-结构一体化设计形式,但是在可设计性、设计自由度方面距离“合理材料放在结构合理位置”这一目标还有较大差距,而且要完全实现还存在很多难题,如不同材料的组合在宏观上和细观上如何实现高精度性能、功能等行为的定量表征,如何精确描述宏观细观尺寸影响材料结构性能的尺度效应,如何实现材料/微结构布局和结构构型的高效率混合参数优化设计等。针对这些问题,长期以来我们和国内外很多同行一起开展了许多卓有成效的工作,如复合材料优化设计、多相材料优化设计、宏细观结构多尺度优化设计等,都让我们一步步向目标接近。

实现这一目标的困难还不仅局限于设计,怎样把这样的结构造出来更是一个突出难题,更准确地说是要实现“把合理的材料按照性能要求用合理的工艺放在结构合理的位置上”,这就把原来的问题上升到材料-结构-工艺一体化设计问题。一方面,在搞清楚材料结构宏观性能表征建模基础上,需进一步分析不同工艺形式对材料和结构力学行为的影响机制,如增材制造虽然能成形几何上非常复杂的结构件,但由于成形过程中产生的缺陷、变形、残余应力等,其材料性能与理想性能之间必然存在较大差距,其他工艺方式也有类似问题。因此,能否准确建立制造工艺与材料结构性能之间的映射关系是解决这一问题的基础,而且合理利用各种工艺产生的材料性能差异,优化设计结构不同部位的工艺形式和相关工艺参数,可以有效提升结构性能。我们把增材制造的成形方向和结构构型同时设计,给出与结构构型匹配的合理成形角度,可以实现结构整体刚度、强度性能20%的提升。

另一方面,为实现承载、防热、轻量化等要求,上述多材料、多尺度结构形式往往异常复杂,对结构制备提出了新挑战。任何一种制造工艺都存在可实现性,如机械加工中的刀具可达性、铸造锻造中的脱模限制、增材制造中的悬空和封闭空间限制等。考虑最终结构设计的工艺可实现性,结构构型的优化设计就必须引入相应工艺约束,体现出不同制造工艺的特征。除了上述我们称之为工艺几何约束的设计要求之外,还有一类称为工艺质量约束,例如不同工艺获得的表面质量、微小缺陷、几何变形等,都应该定量为材料、结构力学性能的折减,进而在优化设计中合理考虑。

 您曾指出增材制造技术与结构整体构型优化设计的融合是未来先进设计制造领域的发展趋势,西工大也基于此成立了金属高性能增材制造与创新设计工信部重点实验室,请介绍一下实验室的创新成果及未来的研发重点。


朱继宏:正如前文所述,随着结构性能和功能要求不断提升,结构形式越来越复杂,对制造工艺要求也越来越高。而增材制造技术正在快速发展,但是如果总是在成形一些传统的结构形式而不去尝试复杂结构形式的极限,它体现出的工艺优势将十分局限。因此,我们经常说增材制造作为一种典型的整体制造方式,和我们开展的结构整体构型的优化设计应当完美融合,而且这一融合将充分释放优化设计的潜力,拓展设计自由度,使结构性能得到进一步提升。

我们西北工业大学作为一所航空、航天、航海工程特色的研究型大学,面向国家重大需求开展基础研究和应用基础研究工作使命所在。我们成立了金属高性能增材制造与创新设计工信部重点实验室,同时也获批了航宇材料结构一体化设计与增材制造装备技术国家级国际合作研究基地,就是为了发挥在结构高性

能轻量化设计和增材制造技术方面的优势,解决我国航空航天航海等复杂构件设计制造中存在的难题。目前实验室主要方向包括:(1)增材制造工艺技术,针对大型复杂金属构件的激光熔覆、沉积和精密复杂构件的激光选区熔化开展研究,揭示材料、工艺及后处理对成形精度和组织性能的影响机制,突破轻质高强合金构件整体化增材制造的精确控形控性关键技术;(2)面向增材制造的创新设计技术,研究增材制造材料与结构的力学行为,深入揭示材料-结构-工艺-性能的多因素、多层次相互影响机理,发展面向增材制造的多材料、多尺度、多组件整体结构拓扑优化创新设计方法,突破增材制造复杂结构件高性能轻量化设计关键技术;(3)增材制造应用技术,面向增材制造开展典型构件设计、应用验证与性能评估,形成面向航空、航天、航海、机械、生物、医疗、艺术等领域的构件全维度、全生命周期、全工艺信息的增材制造设计制造标准规范。

实验室通过持续创新,不仅研发了系列高性能金属增材制造装备,为各领域提供增材制造技术支持和服务,更与航空工业、中国航发、航天科工、航天科技、中国商飞、中核集团、中船重工、中国石油、第四军医大学、空中客车、赛峰集团、GE等建立了长期合作,通过先进的优化设计手段结合增材制造技术实现结构系统的整体化、薄壁空心化和点阵化,先后支撑了我国新型作战飞机、大型客机、武装直升机、运载火箭、高速飞行器、卫星、新型航空发动机等重点型号结构的轻量化、高性能研制。

未来,实验室将面向国家需求持续改进增材制造工艺技术和装备,进一步丰富增材制造的材料体系及其成形工艺参数,完善从结构构型设计、多学科性能优化到增材制造工艺仿真与工艺参数规划、结构件制备、检测与性能评估的一体化研制流程。

: 智能材料与结构已成为航空航天领域减重增效研究的重点,您如何看待其应用前景?

朱继宏: 智能变体、结构功能一体化和智能化是未来飞行器、无人装备的重要形式与发展的主要方向。传统基于机械传动实现的变体部件存在着功效比低、系统复杂、体积庞大、灵活性差等缺点,难以满足未来高性能变体飞行器发展的要求。因此,通过压电陶瓷材料、形状记忆合金、形状记忆聚合物等智能材料作动元件代替复杂机械作动机构,实现包括飞行器作动面、柔性外形等精密系统的主动和精确控制,实现承载、形变一体化的智能变体结构系统,成为结构设计领域面向未来的重要课题。

然而,当前要实现理想、灵活、简洁的智能变体结构还存在大量迫切需要解决的难题。一方面,现有智能材料均无法兼顾大驱动载荷、高响应速度的要求。如压电材料响应快,但驱动变形小、载荷小,无法用于变体结构的主驱动器件,只能作为调节微小变形的辅助作动元器件;形状记忆合金变形大、载荷大,但由于采用温度驱动,不仅响应慢、存在疲劳效应,而且受环境影响较大。因此,发展并制备高性能智能材料及作动元件是未来智能变体结构的必要条件。

另一方面,从智能材料到智能结构还需要解决系列结构系统设计问题。考虑到智能变体结构是一个整体的承载和形变系统,需要使结构系统在作动元件激励和外载联合作用下严格而精确地吻合目标变形形式,实现精确形变的目的。此时,形变精度很大程度上取决于结构系统的传力路径设计,即结构系统中主体结构构型与作动器的布局,而开展其联合拓扑优化设计就成为设计高性能智能变体结构的必要手段。

为了实现这一设计目的,首先需要精确描述智能材料及其器件的激励-驱动变形行为和其他力学行为。

例如针对压电材料和形状记忆合金,建立描述其线性和非线性变形的表征与约束模型,包括智能变体结构系统中压电陶瓷作动元件、形状记忆合金作动元件的电压-驱动力、温度-驱动力建模、从小变形到超弹性的精确形变表征与约束函数建模方法,实现其主动变形的直接精确定量评估;最终形成作动元件与主体结构耦合、精确、高效的非线性变形计算模型与分析方法。其次需要分析作动元件布局与主体结构构型的传力路径匹配机理。精确形变设计的本质是作动元件布局和主体结构构型的匹配优化,需要研究各类作动元件外形参数、物理属性对智能变体结构系统形变模式和系统设计的影响机制,阐明匹配机理;揭示智能变体结构系统精确变形设计约束与结构承载性能的消长关系以及二者的匹配协调机理;研究智能变体结构系统整体设计与传力路径匹配机理的快速高效验证方法。最终建立智能变体结构系统的整体优化设计方法,兼顾系统整体承载性能和变形模式的精确控制。需要发展针对作动元件空间布局与结构构型设计参数的高效灵敏度求解方法以及智能变体结构系统的精确形变约束、几何干涉约束、系统质心约束等多种设计约束的整体优化模型及其高效寻优算法。

依托上述基础研究成果,还需要全面考虑智能变体结构的工程化问题,需要解决系统稳定性、可靠性、服役环境耐受、使用寿命等问题,这些都需要长期的研究和试验来解决。

此外,智能材料与结构并不局限于智能变体结构,近年来大量功能结构,如智能感知蒙皮、自我诊断结构、自修复结构具备了自我感知、适应和调节能力,称为智能化功能结构。这几类结构的设计均需在弄清相关智能材料力学行为和量化功能行为的基础上,开展智能材料与主体结构的一体化设计研究。(责编 铃兰)